

毫秒脉冲星定时研究进展

杨廷高 潘炼德 倪广仁 柯熙政

(中国科学院陕西天文台 临潼 710600)

摘 要

毫秒脉冲星守时的理论和方法研究已取得重要进展,利用现有 2 颗毫秒脉冲星约 10yr 的计时观测资料分析得到的 $TAI - PT$, 其长期稳定度为 2×10^{-14} 。采用合适的长期稳定度算法,由多颗毫秒脉冲星计时观测可以建立综合脉冲星时间尺度。它可以成为与原子时系统比较的重要手段,并对原子时长期稳定度的改进做出贡献。介绍了该领域研究的基本状况,重点对毫秒脉冲星守时的理论方法,综合脉冲星时间及与原子时的关系等进行了讨论和评述。对由双星系统内毫秒脉冲星的轨道运动定义的双星脉冲星时也做了介绍。

关键词 时间频率 — 毫秒脉冲星 — 脉冲星时

分类号: P145.6, P127.12

1 引 言

毫秒脉冲星计时观测对于引力波探测、广义相对论、宇宙论、星际介质和中子星物理研究具有重要意义。毫秒脉冲星守时理论和方法的研究已取得重要进展。毫秒脉冲星时间尺度的研究表明,采用合适的长期稳定度算法,由毫秒脉冲星计时观测可以建立综合的平均脉冲星时间。通过这样的综合平均,可以减少来自于脉冲星本身和其它有关误差的影响。目前得到的综合脉冲星时间,其长期稳定度可优于稳定度水平为 10^{-14} 的原子时^[1]。因此脉冲星时间可做为与原子时比较的重要手段,并能对原子时长期稳定度的改进做出贡献^[2]。随着毫秒脉冲星巡天观测的进展,可望发现更多适合于定时研究的毫秒脉冲星,从而为毫秒脉冲星定时研究开辟广阔前景^[3]。

2 毫秒脉冲星计时原理

绝大多数毫秒脉冲星辐射流量很弱,辐射脉冲往往被淹没在接收器的噪声中。因此,对毫

秒脉冲星的计时观测一般都是在足够长的积分时间内将望远镜获得的脉冲信号进行合成, 从而获得在观测频率上的平均脉冲轮廓。一般选取平均脉冲轮廓上的尖峰作为基准点, 它对应于脉冲星辐射区的一个固定点。脉冲到达时间 (TOA) 指的是接近于积分时间中点的脉冲基准点到达时间。脉冲星计时观测就是对选定观测对象在固定的观测频率上获得一系列的脉冲到达时间, 观测的时间间隔一般为几周, 且连续多年进行监测。TOA 的测量是以原子钟为参考的。参考原子钟要保证定期和国际上重点原子时实验室进行比对, 以便最终使 TOA 的测量能够以国际原子时系统 (如 TAI 等) 为参考。由观测得到的 TOA 系列分析获得脉冲星时间 PT , 首先需建立脉冲星时间的分析模型^[4~10]。

2.1 脉冲星固有参考架

即使人们从相对于脉冲星没有加速运动的固有参考架观测, 所得到的自转周期也会是缓慢变化的, 因为脉冲星通过磁偶辐射会损失能量。在脉冲星固有参考架中, 毫秒脉冲星自转相位可以用级数展开来表示:

$$\phi(t) = \phi(0) + \omega t + \frac{1}{2}\dot{\omega}t^2 + \frac{1}{6}\ddot{\omega}t^3 + \dots \quad (1)$$

式中 $\phi(t)$ 为时刻 t 时的相位, $\phi(0)$ 为相对 t_0 时刻的初始相位, $\omega = 1/p$ (p 为脉冲星自转周期) 为自转频率, $\dot{\omega}$ 和 $\ddot{\omega}$ 为自转频率的一阶和二阶导数。对多数脉冲星而言, 定时研究主要涉及 ω 和 $\dot{\omega}$, 高阶项影响几乎可以忽略。显然, 这种连结脉冲星自转相位与时间 t 的物理过程, 提供了在脉冲星固有参考架中测量脉冲星的自转相位来实现定时研究的可能性。由于对毫秒脉冲星的计时观测是在地面上的天文观测站实现的。这就必须把观测到的脉冲到达时间 T 转换到脉冲星的固有参考架, 一般说来, 只要转换到太阳系质心也就足够了^[11]。对球状星团内的脉冲星还要考虑星团引力势影响的修正^[10]。

2.2 将观测得到的 TOA 归算到脉冲星固有参考架

为精确得到脉冲星固有的自转参数 ω 和 $\dot{\omega}$, 必须将观测到的 TOA 归算到脉冲星固有参考架。假设脉冲星脉冲到达太阳系质心的时间为 t_b , T 为地面上的天文观测站观测到的站心到达时间, 则

$$t_b = T + \frac{r \cdot \hat{n}}{c} + \frac{(r \cdot \hat{n})^2 - r^2}{2cd} - \frac{D}{\omega^2} + \Delta_{E\theta} - \Delta_{S\theta} \quad (2)$$

式中 r 为观测站到太阳系质心的矢量, \hat{n} 是从太阳系质心到脉冲星的单位矢量。(2) 式中右边第 2 项为信号从地球到太阳系质心的传播时间, 第 3 项为周年视差影响。第 2 与第 3 项之和也叫 Roamer 延迟。第 4 项是星际等离子体的色散延迟, 其中 D 为色散常数。 $\Delta_{E\theta}$ 称做 Einstein 延迟, 是由于地球和太阳系其它天体的运动引起的的时间变慢效应及引力红移所致。 $\Delta_{S\theta}$ 项为 Shapiro 延迟, 即太阳附近相对论时空弯曲改正。(2) 式中各项的计算需要采用精确的行星历表, 如 JPL 的 DE200 历表等^[12,13]。同时还要知道毫秒脉冲星的空间坐标、运动和距离等天体测量参数。实际上毫秒脉冲星的这些参数很难精确测定, 也无法精确知道其自转频率及其变化速率; 只能利用多年的 TOA 观测资料, 采用逐步逼近的办法来测定这些参数。首先利用这些参数的近似估计值由上述分析模型对观测得到的 TOA 进行归算, 从而得到每个 TOA 与采用的分析模型的差值, 即残差 R_0 。

2.3 实际应用的 TOA 分析模型

由于分析模型中脉冲星参数的采用值为近似值, 这些采用参数的误差使残差 R_0 呈某些系统性趋势, 这时再用下式进一步进行最小二乘拟合:

$$R = R_0 - \omega_0^{-1}(t - t_0)[\Delta\omega + \frac{1}{2}\Delta\dot{\omega}(t - t_0) + \frac{1}{6}\Delta\ddot{\omega}(t - t_0)^2] \\ + (r_E/C)(\cos\delta_E \cos\delta \sin(\alpha - \alpha_E)[\Delta\alpha + \mu_\alpha(t - t_0)] \\ + (r_E/C)[\cos\delta_E \sin\delta \cos(\alpha - \alpha_E) - \sin\delta_E \cos\delta][\Delta\delta + \mu_\delta(t - t_0)] \quad (3)$$

在(3)式中, R 为拟合的残差, $\Delta\omega$ 、 $\Delta\dot{\omega}$ 和 $\Delta\ddot{\omega}$ 分别为 ω_0 、 $\dot{\omega}$ 和 $\ddot{\omega}$ 的改正值, $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\delta$ 为脉冲星赤道坐标 α 、 δ 的改正值。 μ_α 和 μ_δ 为脉冲星的赤经和赤纬自行。 α_E 和 δ_E 为地心赤道坐标, r_E 为地心至太阳系质心的距离。由拟合可得到更精确的脉冲星自转参数和天体测量参数。再对残差 R 进行分析研究, 可判断分析模型的可靠性, 并进而完善和改进采用的模型, 直到得到满意的结果为止。由(3)式可以看出, 如果拟合采用的脉冲星自转周期有误差, 则残差呈线性变化; 若脉冲星自转周期的导数有误差, 则残差呈二次曲线; 当脉冲星位置有误差时, 残差呈正弦曲线变化, 并且周期为 1yr; 如果脉冲星有自行误差, 则残差呈振幅线性增加的正弦波趋势。另外, 如果脉冲星距离较近, 其视差的影响也会从残差中表现出来。如果脉冲星属于双星系统, 则双星轨道运动参数也应包括在拟合参数中, 并由多年的观测资料拟合得出^[14]。

3 脉冲星时、综合脉冲星时及其与原子时的关系

3.1 脉冲星时

根据上节的讨论, 在合理拟合出脉冲星的基本参数的同时也就确定了其 TOA 的分析模型, 由分析模型可以预报以后的脉冲到达时刻。这就意味着由毫秒脉冲星观测定义了一个时间尺度 $PT^{[1,2]}$: 如果事件 A 代表某观测站第 i 颗脉冲星第 n 个脉冲的到达, 则 $PT_i(A)$ 就是由分析模型计算得到的这个脉冲的到达时刻。在理论上, 任何一个事件都可以与脉冲到达时刻相比较, 正如任何事件可与原子钟的秒信号相比较一样。对于某个脉冲, $PT_i(A)$ 是预报的该脉冲的到达时刻, 而 $AT(A)$ 则是以原子时 AT 为参考的实际观测到的脉冲到达时刻。由 TOA 资料分析最终得到的残差 R 实际上是观测参考的原子时 AT 与由 TOA 分析模型确定的脉冲星时 PT_i 之间的差值, 即 $AT - PT_i$ 。

毫秒脉冲星具有稳定的自转频率, 其自转周期变化率的典型值约为 10^{-19} s/s。脉冲星时 PT 的频率变化可以区分为系统波动和随机性起伏。对系统性变化, 可以通过建立合适模型予以消除。但是, 目前毫秒脉冲星的计时测量精度还不理想, 在几分钟的积分时间内为几百个纳秒量级, 最好的达到 ± 200 ns。计时精度由计时残差估计得到, 主要是测量噪声, 也包括有星际介质传播修正误差影响等因素^[15]。这远低于原子钟的比对精度。当前, 通过 GPS 卫星的原子钟比对达到 20ns。脉冲星时的短期噪声比原子时大, 一般认为, 只利用几个月的脉冲星计时资料不能达到原子时的稳定度水平^[1]。另一个问题是, PT 是由 TOA 的分析模型定义的, 而分析模型中包括的脉冲星的自转频率及其变化速率以及脉冲星的空间位置、自行、距离等参数是由 TOA 资料进行最小二乘拟合得到。仅用短期的 TOA 资料难以可靠确定这些参数, 而这些参数的误差必然导致 PT 的误差。另一方面, 计时残差实质上就是 $AT - PT$ 。由

残差进行脉冲星参数的拟合, 不可避免地会把原子时的部分不稳定性吸收到拟合参数中去。比如, 原子时 AT 的长期变化及其二次项会被脉冲星的自转频率及其导数所吸收; 原子时的某些周年波动会被吸收到脉冲星的位置参数中去。因此这种拟合可能会使脉冲星参数本身发生偏差, 也会使得最终得到的 $AT - PT$ 并不能完全真实地反映 AT 和 PT 之间的差异^[16]。如果毫秒脉冲星 TOA 的测量精度继续保持在目前水平上, 脉冲星的基本参数由残差拟合来测定, 这就很难使 PT 在几个月的短期内达到当前原子时的稳定度水平, 这也是限制 PT 短期稳定度的两个主要因素。

很多研究者研究了毫秒脉冲星 PSR1855+09 和 PSR1937+21。这两颗星具有近 10yr 的 TOA 资料, 也是观测持续时间最长的两颗脉冲星。用 Allan 方差估计其相对频率稳定度如图 1 所示^[17]。可以看出, 在短期内, PT 的频率稳定性不如 AT , 但随着 TOA 测量时间的增加, 噪声很快下降。PSR1855+09 的 TOA 测量精度为 $\pm 900\text{ns}$, 其稳定度曲线随时间增加而下降。对于 PSR1937+21, TOA 的测量精度为 200ns , 测量时间增加到半年以上则可达到 10^{-14} 的水平。但在近 10yr 期间又逞上升趋势, 这主要是因为分析模型中没有包括自转频率变化的高次项。分析表明, 对该星最终拟合的残差(即 $AT - PT$) 具有明显的时间的三次项。一种解释, 认为在 PSR1937+21 周围可能有一颗行星, 其轨道运动的周期约为 10yr。也可能是在太阳和该脉冲星连线方向上有一恒星, 由于相对运动的原因, 该恒星引起的引力延迟变化使得计时残差具有三次项^[1]。这些解释有待用更长时间的观测来证实。也有人认为这可能是该脉冲星内在因素所致。Petit G 等人在 PSR1937+21 的 TOA 分析模型中增加了时间的三次项, 则所得结果消除了图 1 中 PSR1937+21 稳定度曲线的上升趋势, 与 PSR1855+09 相似, 随时间增加继续下降。主要因为 TOA 的观测持续时间不够长, 目前对 PT 长期稳定度的极限还无法做出估计。一般结论是, 现有的实测资料表明, PT 在 1yr 左右中的稳定度达到 10^{-14} 水平, 足以和原子时相比较, Matsakis 等人将由 PSR1855+09 确定的 PT 与原子时 $TA(A.1)$ 做了比较, 其结论是 PT 比 TA 更稳定^[18]。

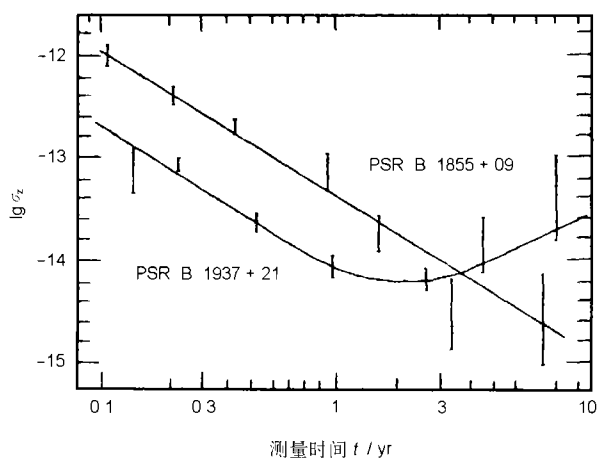


图 1 PSR1855+09 和 PSR1937+21 的相对频率稳定度^[17]

可以看出, 在短期内, PT 的频率稳定性不如 AT , 但随着 TOA 测量时间的增加, 噪声很快下降,

PSR1855+09 的 TOA 的测量精度为 $\pm 900\text{ns}$, 其稳定度曲线随时间增加而下降

随着更多毫秒脉冲星的发现, 人们能选择多颗星长期观测。Nancay 天文台选取 20 颗毫秒脉冲星进行计时观测, 选星的条件是自转周期的导数小于 $2 \times 10^{-20} \text{s/s}$, 估计这些星具有很好的频率稳定度。从强调频率长期稳定度出发, 选择合适的毫秒脉冲星长期不间断观测, 是建立脉冲星时的基础。在脉冲星时归算时, 参考的原子时标准应具有^[16]: (a) 足够的读出精度; (b) 好的长期稳定度; (c) 尺度的准确度, 即与 SI 秒的一致性; (d) 无频率漂移和频率的季节性变化。TAI 系统是国际原子时服务的近实时系统, BIPM 事后处理得到的 TT 系统更接近上述要求。TT 系统每年都重新修订, 它综合了 TAI 的长期稳定度和频率基准的准确度, 并力图消除频率漂移和季节性变化, 因此被认为是目前最适合脉冲星时研究的参考系统。脉冲星时长期稳定度的优势提供了目前检验、评价并进而改进原子时系统长期性能的唯一手段。

3.2 综合脉冲星时

除去原子时和毫秒脉冲星自转的内在噪声外, 影响 $AT-PT$ 的噪声源还有星际介质传播改正的误差、引力波的影响和太阳系行星历表的误差。理论上这些噪声源具有可识别的特征, 可以通过计时阵的观测方案来加以检测^[9]。但对建立稳定的脉冲星时间尺度而言, 可以认为除原子时本身的噪声外, 上述所有其它噪声源对不同的脉冲星是独立。通过对多颗脉冲星定义的脉冲星时 PT_i 加权平均建立综合脉冲星时间 PT_{ens} , 可削弱各独立噪声源的影响, 所得综合脉冲星时间 PT_{ens} 应该比任何单星定义的 PT_i 更加稳定^[1,2]。设计综合脉冲星时算法的出发点是获得最好的长期稳定度, 为此, 综合脉冲星时 PT_{ens} 应该是脉冲星 PT_i 的加权平均; 权重的选取应该以脉冲星时 PT_i 的长期稳定度为依据; 尽量避免由于残差的系统性趋势引入不必要的噪声。即 PT_{ens} 可由下式表示:

$$AT - PT_{\text{ens}} = \sum_i W_i \cdot (AT - PT_i) \quad (4)$$

式中, 权重 W_i 应该反比于该脉冲星时的不稳定度, 如果参加综合的 PT_i 数足够多, 最好采用 N 角帽方法计算 PT_i 的不稳定度^[19], 一般情况下可用 Allan 方差来计算。所有 PT_i 的权重应该归一化。

在计算综合脉冲星时的时候, 最好能得到原始的 TOA 观测数据, 并且用统一分析模型来处理, 以便保证 PT_i 的一致性。如果仅能得到残差数据, 应该同时具有模型参数, 以便核对所使用的模型之间是否有差异。特别对不同测站所得到的对同一脉冲星的观测资料, 应该消除它们之间的偏差。残差中残余的确定性趋势应该消除。综合时采用等间距的资料是方便和合适的。为达到尽量好的效果, 应尽量注意以下几个方面^[20]: 参加综合的脉冲星应具有尽量高的自转稳定度; TOA 观测具有尽量高的信噪比; 要有相当数量的脉冲星参加综合; TOA 数据跨度要足够长; 参考的原子时标准具有好的长期稳定度; 测站与参考钟之间要有尽量高的时间传递精度; 分析模型和相关修正要采用最合适的模型和理论; 采用最佳的数据采集及数据处理系统; 尽量兼顾其它科学目标对脉冲星 TAO 观测的要求, 如为检测引力波, 就应考虑对脉冲星的正交分布的要求。

由于新发现的毫秒脉冲星可供观测或已观测过的脉冲星由于某种原因中断观测, 会引起参加综合的脉冲星数目的增减, 为避免因此而导致的时间阶跃, 当脉冲星数目有变化时应加

一改正值 a ，使

$$AT - PT_{\text{ens}} = AT(t + \delta t) - [PT'_{\text{ens}}(t + \delta t) + a] \quad (5)$$

其中， PT'_{ens} 是脉冲星数目变化后计算得到的新的综合脉冲星时，而 a 则是 PT'_{ens} 与脉冲星数目变化之前计算的 PT_{ens} 的差值。与原子时尺度的算法不同，对脉冲星时不需做频率改正，因为在 PT_i 中已经消除了频率变化的系统性趋势。

综合脉冲星时 PT_{ens} 的长期稳定度可好于稳定度水平为 10^{-14} 的原子时，并且随着脉冲星的数目和观测时间的增加， PT_{ens} 长期不稳定度的随机部分可望减小到比原子时系统低得多的水平^[1]。因此，只要保持脉冲星观测的连续性，就能利用 PT_{ens} 分析和改进原子时的长期稳定度，也可以利用 PT_{ens} 将原子时的准确度从一个时间段传递到另一个时间段。例如，当原子时进行频率校准所用的基准暂时失效时，可利用 PT_{ens} 来保持原子时的准确度。再如，如果将来频率基准具有更高的准确度，在运行多年后，可利用综合脉冲星时将这种准确度作一反向传递，改进在此之前的原子时尺度的准确度^[2]。

4 双星脉冲星时

约 70% 的毫秒脉冲星属于双星系统。事实上，有可能利用脉冲星绕其伴星的轨道运动相位来定义一种动力学时间尺度。在双星系统质心参考系中，能够找到脉冲星的轨道相位与参考坐标时 T 之间的理论关系，从而由脉冲星轨道运动的相位提供 T 。再通过双星参考系至地心参考系的相对论转换，脉冲星的轨道相位就提供了地心坐标时，被称为双星脉冲星时 BPT^[1]。这涉及到强引力场中的运动方程，比较复杂。然而理论完全描述了轨道相位与时间 T 之间的关系，它不像前面介绍的基于脉冲星自转的脉冲星时那样缺少能预报脉冲星自转周期变化速率的理论。引力理论能够预报双星系统轨道周期 P_0 的变化速率。实际上，密近双星系统中脉冲星的轨道运动不受外部摄动影响，因而具有很高的内在稳定性，人们可以在 10yr 以上的时期内高精度地预报这种轨道运动^[21]。

建立 BPT 依据的方程式为：

$$T = T_0 + P_0(N + \frac{1}{2}\dot{P}_0 N^2). \quad (6)$$

式中， T_0 是初始历元， N 是围绕双星系统质心轨道运动的周数， P_0 和 \dot{P}_0 是对应初始历元的轨道周期及其变化速率。脉冲星的自行和相对于观测者的加速度会产生 P_0 的二阶和高阶导数项。影响 BPT 长期稳定度的重要噪声源是 TOA 中由天体物理原因产生的低频噪声。这包括相位的随机游走噪声，星际介质传播和宇宙初始背景引力波产生的噪声。噪声的频谱 $S(f)$ 可用幂律函数 h_s/f^s 来描述，其中 f^s 是噪声的傅立叶频率， h_s 是它的幅度。考虑具有圆形轨道的双星系统的简单模型，并设 $N(t, \lambda_a)$ 为观测信号中与脉冲星自转和轨道运动参数 λ_a 相关的确定部分，则有：

$$N(t, \lambda_a) = \omega t + \frac{1}{2}\dot{\omega}T^2 + \frac{1}{6}\ddot{\omega}T^3 + \dots, \quad (7)$$

$$T + \chi \sin[n(T - T_0) + \dot{n}(T - T_0)^2] = t - t_0. \quad (8)$$

上二式中, ω 是脉冲星的自转频率, $\dot{\omega}$ 和 $\ddot{\omega}$ 是 ω 的一阶和二阶导数, n 是双星系统的轨道频率 ($n = 2\pi/P_b$, P_b 为轨道周期), \dot{n} 是 n 的一阶导数, χ 是脉冲星轨道半长轴在视线方向的投影, T 是脉冲星本征时, t 是太阳系质心坐标时, T_0 是初始时刻, t_0 是天文观测的初始历元 ($t_0 \neq T_0$)。为比较研究脉冲星时 PT 和双星脉冲星时 BPT 的稳定性, 令 $y = \delta\omega/\omega$, $\nu = \delta n/n$ 。其中 $\delta\omega$ 和 δn 为参数的真值与最小二乘拟合估计值的差。用 $\sigma_y^2(\tau)$ 和 $\sigma_\nu^2(\tau)$ 分别表示测定的脉冲星自转频率和轨道运动频率的弥散度, 它们能充分揭示时间尺度 PT 和 BPT 的稳定度。Rodin 等人给出了 $\sigma_y^2(\tau)$ 和 $\sigma_\nu^2(\tau)$ 对应于观测量 TOA 中各类噪声的相关表达式^[21]。各表达式描述了 $\sigma_y^2(\tau)$ 和 $\sigma_\nu^2(\tau)$ 与相关噪声的幅度 h_s (谱指数 $s = 0 \sim 6$) 和 TOA 观测时间跨度 τ 的依赖关系。这种依赖关系表明 $\sigma_y^2(\tau)$ 和 $\sigma_\nu^2(\tau)$ 都随 τ 的增加而减小。表示 PT 稳定度的 $\sigma_y(\tau)$ 在 $s = 3$ 的噪声占主要地位时开始随 τ 增大。表征 BPT 稳定度的 $\sigma_\nu(\tau)$ 一直随 τ 的增加而减小, 直到 $s \geq 5$ 的噪声占主要地位时为止。这说明 BPT 比 PT 具有更高的频率长期稳定度。 $\sigma_y(\tau)$ 极小值受制于 $s = 3$ 的噪声, 这主要由星际介质大尺度的不均匀性所致。 $\sigma_\nu(\tau)$ 的极小值受 $s \geq 5$ 的噪声影响, 这类噪声主要来自于宇宙初始背景引力波。对于圆形轨道的双星脉冲星, $\sigma_\nu(\tau)$ 极小值可近似表示为:

$$\sigma_{\nu, \min} \approx 2.4 \times 10^{-20} \sqrt{\Omega_g P_b^2 \chi^{-1} h}. \quad (9)$$

这里, Ω_g 是宇宙背景引力波的能量密度, $h = H_0/100$ (H_0 为 Hubble 常数), P_b 为双星轨道周期, χ 为轨道半长轴在视线方向投影。可见, $\sigma_\nu(\tau)$ 极小值不仅与 Ω_g 和 h 有关, 而且取决于轨道参数。对于椭圆轨道双星, $\sigma_\nu(\tau)$ 还依赖于轨道的偏心率。据推算, 在 $\Omega_g h^2 \leq 10^{-8}$ 情况下, $\sigma_\nu(\tau)$ 能达到 $10^{-15} \sim 10^{-16}$ 的水平^[22]。因此, 选取具有短轨道周期和小的 P_b/χ 比值的脉冲星双星系统, 能够使 $\sigma_\nu(\tau)$ 达到尽量小的值, 这更有利于在尽可能长的时期内保持 BPT 时间尺度的高稳定度。

参 考 文 献

- 1 Petit G, Tavella P. *Astron. Astrophys.*, 1996, 308: 290
- 2 Petit G, Thomas C. *An Ensemble Pulsar Time*, In: Proc. 24th PTTI meeting, 1992: 73
- 3 Rougeaux B, Petit G. *A Survey For Very Fast and Dispersed Millisecond Pulsar*, Paris: BIPM, 1999
- 4 Hellings R W. *A. J.*, 1986, 91: 650
- 5 Rawley L A, Taylor J H et al. *Science*, 1987, 238: 761
- 6 Rawley L A, Taylor J H et al. *Ap. J.*, 1988, 326: 947
- 7 Davis M M, Taylor J H et al. *Nature*, 1985, 315: 547
- 8 Backer D C. *Ap. J.*, 1976, 209: 895
- 9 Foster R S, Backer D C. *Ap. J.*, 1990, 361: 300
- 10 Backer D C, Hellings R W. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1986, 24: 537
- 11 Kaspi V M. In: Hog E, Seidelmann P K eds. *Astronomical and Astrophysical Objectives of Sub-millisecond Astronomy*, printed in Netherlands, 1995: 163
- 12 Standish E M. *Astron. Astrophys.*, 1992, 114: 297
- 13 Fukushima T. *Astron. Astrophys.*, 1995, 294: 895
- 14 Wolszczan A. *Science*, 1994, 264: 538
- 15 Foster R S, Cordes J M. *Ap. J.*, 1990, 364: 123
- 16 Guinot B, Petit G. *Astron. Astrophys.*, 1991, 248: 292

- 17 Kaspi V M, Taylor J H *et al.* *Ap. J.*, 1994, 428: 713
- 18 Matsakis D N, Taylor J H *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1998, 329: 620
- 19 Petit G, Tavella P *et al.* In: *Proc. 6th European Frequency and Time Forum*, 1992: 57
- 20 Appenzeller I ed. *Highlights of Astronomy*, Dordrecht: Kluwer, 1995, 10: 227
- 21 Rodin A E, Kopeikin S M *et al.* *Astronomical Time Scale Based On the Orbital Motion of Pulsar in a Binary System*, Pushchino Radio Astronomy Observatory, 2001
- 22 Ilyosov Yu P, Kopeikin S M *et al.* *Astronomy Letters*, 1998, 24: 228

Research Progress on Metrological Uses of High Precision Millisecond Pulsar Timing Data

Yang Tinggao Pan Liande Ni Guangren Ke Xizheng

(Shaanxi Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Lintong 710600)

Abstract

We reviewed the research progress on time keeping metrology using millisecond pulsars. Millisecond pulsars exhibit a very stable spinning period, so that their rotational phase may be used as a time reference, named pulsar time (PT). The analyses of high precision timing data for two millisecond pulsars showed that the long-term stability of $TA - PT$ may be compared to atomic time TA. It is possible that an average pulsar time scale PT_{ens} may be deduced through a long-term stability algorithm using precision timing data from more millisecond pulsars. Such an ensemble average can reduce the level of the instabilities originating from individual pulsar and other sources of noise. By comparison between ensemble pulsar time and terrestrial atomic time, one will get some insight on long term stability of atomic time. The orbital motion of close binary pulsar can be used for generation of an astronomical ephemeris time scale BPT. An introduction on the definition of binary pulsar time BPT was given.

Key words Time and frequency—Millisecond pulsar—Pulsar time scale